

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA ELECTRÓNICA**

**TEMA:
EFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA
MULTIMODO COMPENSADA SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA**

**AUTOR:
MICHELLE ESTEFANIA CUYAGO LOYOLA**

**TUTOR:
MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA**

Quito, agosto del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Michelle Estefania Cuyago Loyola, con documento de identificación N° 1725540296, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de titulación intitulado: EFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA MULTIMODO COMPENSADA SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....

Michelle Estefania Cuyago Loyola
C.I. 1725540296

Quito, agosto del 2021

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el artículo académico, EFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA MULTIMODO COMPENSADA SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA, realizado por Michelle Estefania Cuyago Loyola, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2021



Milton Napoleón Tipán Simbaña
C.I. 1713583126

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación con profundo amor y respeto a mis padres Luis Cuyago y María Loyola que con sus sacrificios y entrega me brindaron la oportunidad de formarme como profesional, por ser mi fortaleza en toda mi carrera y creer en mis capacidades, desde que inicie mi vida académica me propuse llenarlos de orgullo y hacerles saber que su esfuerzo, su dedicación y su confianza depositada en mi persona tenga su recompensa. A mi hermano David Cuyago por acompañarme día a día en este largo trayecto y no dejarme caer en las adversidades hasta llegar a cumplir mis ideales.

Por nuevos logros junto a ustedes.

Michelle

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera muy profunda a nuestro PADRE CELESTIAL que me ha bendecido constantemente durante mi vida, también de manera especial a toda mi FAMILIA por la confianza total entregada a mi persona al estar siempre a mi lado y pendientes de cada paso y situación que se ha presentado en el camino estudiantil. Mi agradecimiento particular a mi tutor el ING. MILTON TIPÁN SIMBAÑA por brindarme su sabiduría con nobleza y entusiasmo para culminar con éxito este anhelado artículo académico.

EFFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA MULTIMODO COMPENSADA SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA

EFFECT OF THE PROFILE OF THE REFRACTION INDEX OF A COMPENSATED MULTIMODE FIBER ON THE POWER DISTRIBUTION

Michelle E. Cuyago¹, Milton N. Tipán²

Resumen

En este artículo, nosotros investigamos el efecto del perfil del índice de refracción de la fibra óptica multimodo según el modelo de Cambridge 81 cuando es compensada con una fibra óptica de dos modos sobre la distribución de potencia a la salida del filtro modal. Dos parámetros fueron considerados: longitudes de onda de operación de 850 nm y 1550 nm con lanzamiento restrictivo y la longitud de la fibra compensadora de 10 m a 100 m. Los resultados revelan que combinación del perfil del índice de refracción de la fibra multimodo con defecto de centro y del filtro modal con índice paso, permiten obtener la mejor distribución de potencia, para longitudes del filtro modal menores a 20 m operando en longitudes de onda.

Palabras claves: DMD, FMF, Índice de refracción, MMF, MPD.

Abstract

In this article, we investigate the effect of the refractive index profile of multimode optical fiber according to the Cambridge 81 model when it is compensated with a two-mode optical fiber on the power distribution at the output of the modal filter. Two parameters were considered: operating wavelengths of 850 nm and 1550 nm with restrictive launch and the length of the compensating fiber from 10 m to 100 m. The results reveal that the combination of the refractive index profile of the multimode fiber with center defect and the modal filter with step index, allow to obtain the best power distribution, for modal filter lengths of less than 20 m operating at wavelengths.

Keywords: DMD, FMF, Refractive index, MMF, MPD.

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica (Mención en Telecomunicaciones) – Universidad Politécnica Salesiana - Sede Quito, Campus Sur.

² Docente de la Universidad Politécnica Salesiana, miembro del grupo de investigación en electrónica, telemática y control “GIETEC”, Campus Sur.

1. Introducción

El crecimiento de múltiples aplicaciones tecnológicas de corto alcance ha hecho de la fibra óptica multimodo (Multimode Fiber, MMF) una herramienta indispensable para las interconexiones tanto en redes de área local (Local Access Network, LAN) como en centros de datos [1]. Los sistemas de transmisión se ven obligados a trabajar a velocidades más altas gracias al incremento del tráfico IP de datos generados por teléfonos inteligentes en una LAN y de servicios que demandan internet de alta velocidad [2], [3]. La MMF de índice gradual (Graded Index Multimode Fiber, GI-MMF) dispone de un porcentaje muy alto en operabilidad en cuanto a las instalaciones presentes en los centros de datos [2], disminuyendo los efectos no lineales y adquiriendo mayor flexibilidad de alineación al trabajar con los conectores [4].

La distancia y velocidad de bit máxima que transmite una señal en un enlace MMF depende del escenario de lanzamiento [5], debido a que las características de los componentes ópticos influyen en la distribución de potencia modal (Modal Power Distribution, MPD) a la entrada de la MMF [6]. El desafío de escalar la red MMF ha impulsado el avance de varias técnicas de lanzamiento central y lanzamiento desplazado que permitan mejorar la limitación de la capacidad del ancho de banda ocasionada por el retardo de modo diferencial (Differential modal Delay, DMD) [7], restringiendo la excitación modal de diversos modos de orden inferior o superior y lograr así extender la velocidad de transmisión de un enlace, incluso a 50 [Gb/s] [8].

La fibra de pocos modos (Few Mode Fiber, FMF) siendo una fibra de guiado débil soporta la propagación de decenas de modos polarizados linealmente (Linearly Polarized, LP) que viajan a distintas velocidades en diferentes grupos [9], debido al tamaño de la apertura numérica (Numerical Aperture, NA) está diseñada para restringir el número de modos guiados por la fibra [10]. La FMF al presentar características de la

MMF y (Single Mode Fiber, SMF) con respecto a su atenuación y radio, lo que permite controlar de mejor manera el acoplamiento intermodal, con el fin de incrementar la capacidad en las redes de datos multiplexación por división de modo (Mode Division Multiplexing, MDM) estas están siendo usadas, sin embargo, el acoplamiento y distribución de potencia entre la MMF y FMF ha sido poco estudiada. Este artículo presenta un estudio sobre la distribución de potencia existente en el acoplamiento de las fibras MMF y FMF para el modelo de Cambridge 81, mismo que representa diferentes errores en los perfiles del índice de refracción cuando se construyen las fibras MMF [4], [11].

Este documento está estructurado de la siguiente manera. La sección II, describe la configuración del esquema de transmisión DMD, la estructura del filtro modal por medio de la implementación de la FMF y el diseño de los perfiles del modelo estadístico de Cambridge-81. La sección III, presenta los resultados de la evaluación de la simulación de cada uno de los perfiles mediante el esquema DMD a diferentes longitudes de onda de 850 nm y 1550 nm al aplicar las distintas técnicas de lanzamiento de modo restringido (RML). La sección IV se concluye, el estudio en cuestión argumentando que la longitud de la fibra compensadora o filtro modal debe operar máximo hasta 20 m debido a que a menor longitud existe mayor distribución de potencia.

2. Configuración de los parámetros integrados del esquema DMD.

2.1 Esquema de transmisión

El esquema de transmisión de la Figura 1 fue realizado en Optsim RSoft 9.0 este comprende dos zonas. La primera, conformada por una fuente láser con longitudes de onda de operación de 850 nm y 1550 nm, seguido por un bloque que simula una SMF con un núcleo de radio 4.1 μm a una longitud de onda de 0.01 m, que

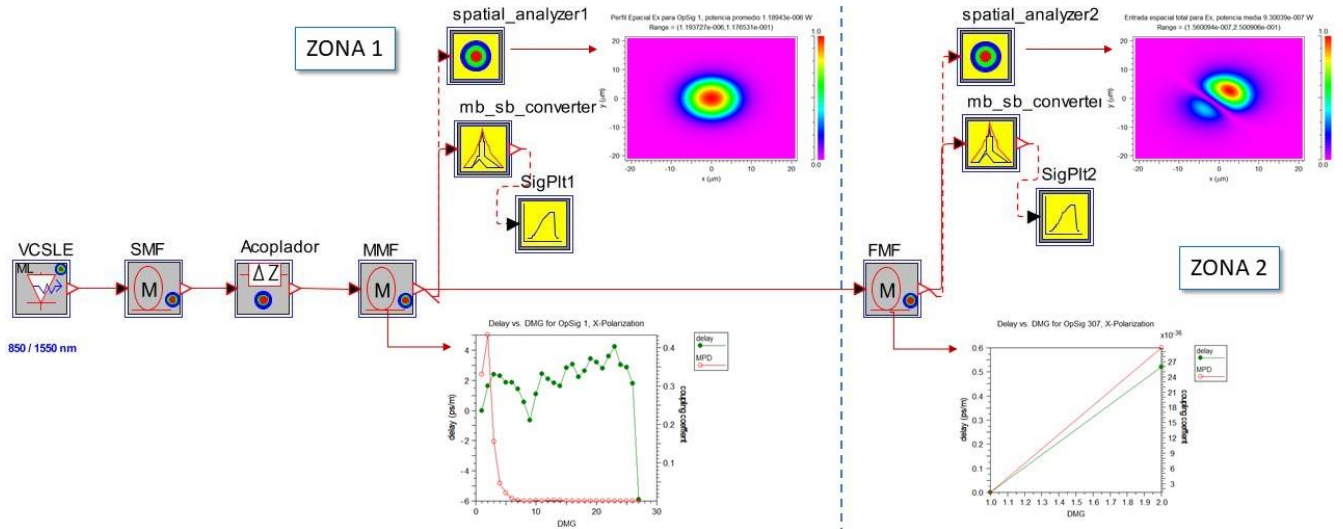


Figura 1. Esquema de transmisión de la co- simulación del modelo número de Cambridge-81 y el filtro modal. Zona 1 fibra sin compensación, Zona 2 fibra compensada [4].

conecta al acoplador el cual fue desplazado desde $0 \mu\text{m}$ a $25 \mu\text{m}$ para realizar el lanzamiento restrictivo cada $1 \mu\text{m}$ y finalmente se tiene el bloque MMF con un radio de $25 \mu\text{m}$ y una distancia de 400 m basada en la categoría de fibra OM4 para $10 \text{ Gb Ethernet 10-G-BASE-SR}$, se considera el comportamiento del campo eléctrico como modos linealmente polarizados. Cada modo LP_{lm} está representado por subíndices l (índice de modo azimutal) y m (índice de modo radial) que forman un par ordenado permitiendo identificar el número total de grupos de modos M mediante la Ecuación (1) [4], así para el modo LP_{01} se tiene $M = |0| + 2 * 1 + 1 = 3$.

$$M = |l| + 2m + 1 \quad (1)$$

La zona 2 integrada por el filtro modal el cual fue diseñado mediante la implementación de la fibra FMF con el fin de restringir el número de modos guiados por la fibra MMF, en base a la constante de propagación normalizada b y al parámetro de corte denotado como frecuencia normalizada V [12], [13], el cual permite identificar qué cantidad de modos soporta la fibra óptica así, para un $V \leq 2,405$ la fibra óptica actúa como SMF admitiendo la propagación del modo fundamental, pero si V llega a ser superior la fibra óptica actuará de manera MMF.

La frecuencia normalizada se relaciona con la apertura numérica NA mediante la Ecuación (2) [10], a través del número de onda k_0 por medio de la Ecuación (3) y el radio de la fibra óptica a , esto permite encontrar el valor del índice de refracción del núcleo y del revestimiento mediante la Ecuación (4) [10], donde λ_0 es longitud de onda en el vacío, n_1 es índice de refracción del núcleo (core) y n_0 es el índice de refracción del revestimiento (cladding). Tomando en consideración la aproximación de guía débil, para la cual la diferencia entre los índices del perfil de refracción está entre $0.1\% < \Delta < 1\%$, que se cumple para las fibras ópticas prácticas, esta puede escribirse como la Ecuación (5) [10].

$$V = k_0 * a * NA \quad (2)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}; \quad (3) \quad NA = \sqrt{(n_1^2 - n_0^2)} \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_0}{n_1} \quad (5)$$

Para el diseño de la FMF que permite pasar solo los modos LP_{01} y LP_{11} se establecieron los siguientes parámetros: $V = 3.5$, $a = 7 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.482$, $\Delta = 0.3654831\%$, obteniéndose $n_0 = 1.4805$ para $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ y $n_1 = 1.44402$, $\Delta =$

0.3654831%, obteniéndose $n_0 = 1.43874$ para $\lambda_0 = 1550$ nm.

2.2 Diseño de los perfiles del índice de refracción del modelo de Cambridge 81.

El modelo estadístico de Cambridge-81 fue generado en Matlab R2016b-V9.1 mismos que representan los defectos de fabricación de los perfiles del índice de refracción y que disminuye el producto distancia ancho de banda de la MMF, estos pueden ser representados como defectos centrales, defecto de desviación de α y el defecto de borde como se observa en la Figura 2.

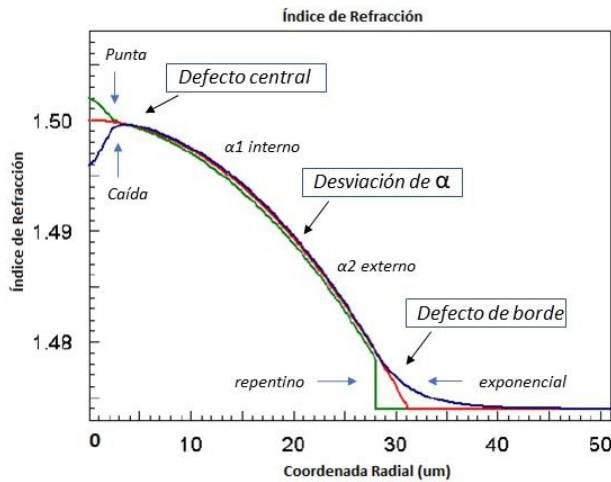


Figura 2. Índice de refracción - Defectos de fibra [4].

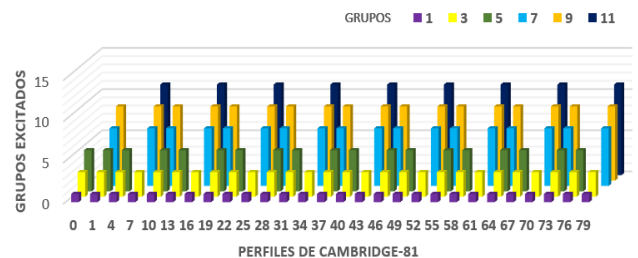
Cada uno de estos defectos presentan una particularidad al momento de su configuración, el defecto central simula un modelo gaussiano con una amplitud en su defecto en punta de +0,002 y -0,004 en su defecto de caída, el defecto de desviación de α al presentar una distorsión mixta cuenta con 3 valores distintos para $\alpha 1$ interno y $\alpha 2$ externo: (1,89; 1,97; 2,05). No obstante, el defecto de interfaz del núcleo presenta un defecto exponencial y repentino. Al combinar las diferentes distorsiones se da lugar a los 81 posibles perfiles del índice de refracción, los cuales se crearon considerando los índices del núcleo y del revestimiento indicados en la Tabla 1, para las longitudes de onda de 850 nm y 1550 nm.

Tabla 1. Índice de refracción de acuerdo a longitud de onda.

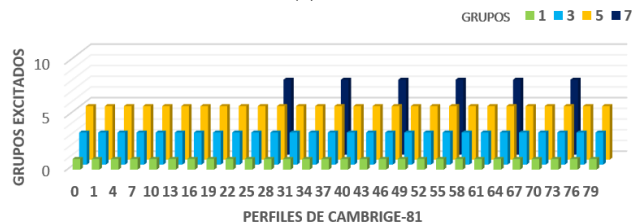
Longitud de onda [nm]	Índice de refracción	
	Núcleo	Revestimiento
850	1.482	1.4525
1550	1.44402	1.3620

3. Resultados y discusiones

Implementando la técnica de lanzamiento de modo restringido en la MMF, a diferentes longitudes de onda para los 81 perfiles de índice de refracción, se obtuvieron los diferentes modos de excitación en la fibra óptica como se muestra en la Figura 3. Se observó que cada tres perfiles el número de modos excitados son los mismos, incluyéndose el grupo 11 y el 7 a partir de los perfiles 4 y 28 para las longitudes de onda de 850 nm visto en la Figura 3(a) y 1550 nm observado en la Figura 3(b) respectivamente, lo cual llevo a reducir nuestro análisis a solo 28 perfiles, esto se debe a que los defectos en el índice del perfil de la fibra solo varían en un parámetro adicional en los 3 perfiles consecutivos.



(a)



(b)

Figura 3. Grupos de modos energizados para (a) 850 nm y (b) 1550 nm.

Además, la distribución de potencia fue analizada mediante el coeficiente de acoplamiento normalizado a la salida de la MMF

como se observa en la Figura 4, una excitación selectiva de grupos modales impares se observa para el lanzamiento a 0 μm , mientras que para el desplazamiento de 4 μm , todos los grupos pares e impares son excitados, tanto para 850 nm como para 1550 nm. La potencia se ve distribuida en los diferentes modos excitados, obteniéndose una potencia mayor en el modo fundamental cuando el lanzamiento no está desplazado alcanzándose un coeficiente de acoplamiento de 0.6 para 850 nm y 0.89 para 1550 nm, lo que implica que se tiene un mejor acoplamiento a una mayor longitud de onda, pese a que la fibra MMF está optimizada para 850 nm, lo anterior puede deberse a la forma del perfil del índice de refracción de la fibra.

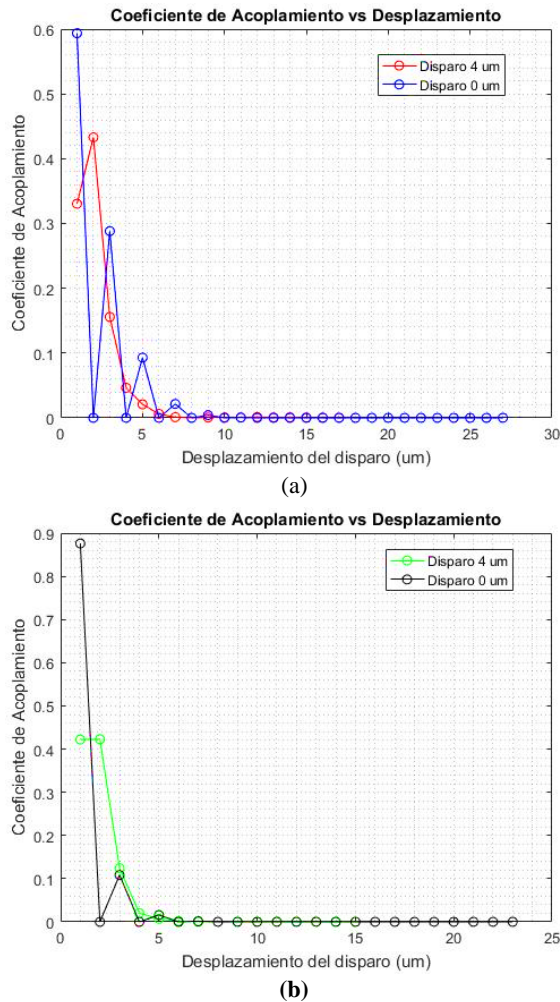


Figura 4. Coeficiente de Acoplamiento Vs Desplazamiento del perfil 20 para (a) 850 nm y del perfil 19 para (b) 1550 nm.

Por lo anterior, se puede establecer que una combinación del perfil del índice de refracción de la MMF y del filtro modal pueden lograr una mejor distribución de potencias, para ello se procedió a medir el coeficiente de acoplamiento para los 81 perfiles del índice de refracción a distancias de 0 μm y 4 μm para las longitudes de onda de operación con el filtro modal de longitud 10 m, obteniéndose los perfiles que tienen mayor potencia como se muestra en la Tabla 2, de los cuales se eligió uno como referencia para sus características similares.

Tabla 2. Perfiles con la máxima intensidad de potencia.

Clasificación de perfiles para máxima potencia			
Longitud de onda [nm]	Disparo de láser [μm]	Perfil	Referencia
850	0	34, 35 y 36	34
	4	20 y 21	20
1550	0	19,20 y 21	19
	4	73,74 y 75	73

Sin embargo, la longitud del filtro modal es un parámetro importante en la variación de potencia y para evaluar su efecto se procedió a medir la potencia total de salida del filtro modal a las longitudes de 10 a 100 m en pasos de 10, logrando identificar que la máxima intensidad de potencia se encuentra a una distancia de 10 m, además de exhibir una caída de potencia representativa cercana a cero, la Figura 5(a) muestra un desvanecimiento de potencia en 30 y 90 m en el filtro modal para el perfil 20, de igual manera para el perfil 34 la potencia decae en 40 y 90 m por lo que estas distancias no podrán ser consideradas para una implementación práctica del filtro modal. En la Figura 5(b) se observa que para el perfil 19 no se podría contemplar una distancia para el filtro modal de 90 m debido a que existe un profundo desvanecimiento de potencia, de manera similar en el perfil 73 las distancias de 70 m tampoco podrían ser elegidas ya que presentan una reducción de potencia considerable cuando se utiliza el filtro modal.

Esto se debe a la longitud de bateo que se tiene en la FMF y que hace que los modos energizados interactúen destructivamente y la potencia final decaiga; este bateo puede verse en la Figura 6(a) donde se observa la potencia del campo electromagnético total y de los modos LP01 visto en la Figura 6(b), LP11a observado en la Figura 6(c), LP11b mostrado en la Figura 6(d) que sale del filtro modal luego de la compensación; en consecuencia, una distancia de hasta 20 m puede ser usada en el filtro modal.

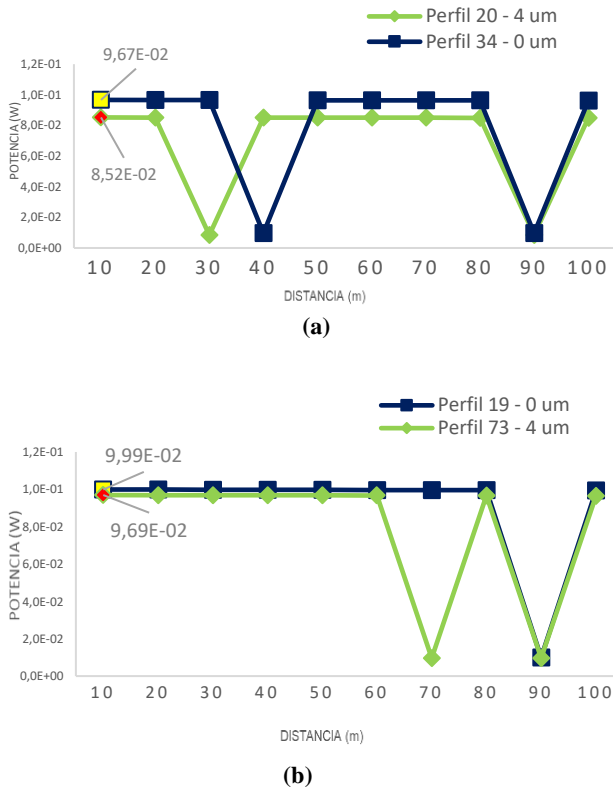


Figura 5. Potencia vs distancia para (a) 850 nm y (b) 1550 nm con filtro modal.

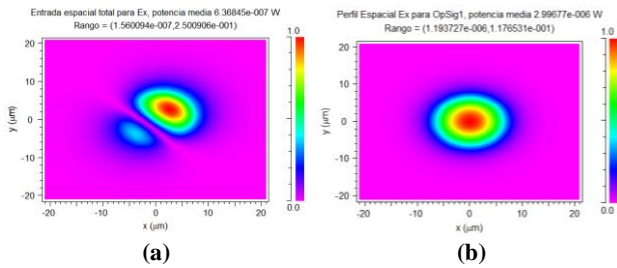


Figura 6. Vista de la componente Ex del perfil 19 a un disparo centrado para un λ de 1550 [nm], (a) Campo electromagnético total, (b) Modo LP01, (c) Modo LP11a, (d) Modo LP11b.

4. Conclusión

En este trabajo, el efecto de los perfiles del índice de refracción de una MMF según el modelo de Cambridge compensada con un filtro modal basado en una FMF sobre la distribución de potencia de salida fue investigado. La técnica de lanzamiento restringido del láser a 0 μm y 4 μm a dos diferentes longitudes de onda de operación de 850 nm y 1550 nm fue empleado.

Los resultados han mostrado que una combinación entre el perfil del índice de refracción de la MMF y la del filtro modal puede mejorar la distribución de potencia, encontrándose que el perfil 19 tienen mejor distribución de potencia a 1550 nm. Sin embargo, el perfil 20 puede adaptarse mejor a trabajar en ambas longitudes de onda, con el láser centrado en 1550 nm y con un desplazamiento de 4 μm a 850 nm.

Adicionalmente, el impacto de la longitud de la fibra compensadora fue analizada, mostrando que la longitud de la fibra compensadora no debe ser mayor a 20 m para que pueda operar a ambas longitudes de onda, lo anterior indica que es posible generar un adecuado filtro modal que permita incrementar las distancias de las redes de corto alcance basadas en el tipo de perfil de la fibra multimodo.

Referencias

- [1] M. S. Kim, B. G. Kim, S. H. Bae y Y. C. Chung, «Effects of Multi-Level Format in MMF System Based on Mode-Field

- Matched Center-Launching Technique,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, n° 22, doi: 10.1109/LPT.2018.2873822, pp. 1972-1975, 15 Nov.15, 2018.
- [2] N. Sheffi y D. Sadot, «Tilted Gaussian Beams Multiplexer for Graded-Index Multimode Fiber in Data-Centers Interconnections,» *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, n° no. 3, Art no. 7901816, doi: 10.1109/JPHOT.2015.2434871., pp. 1-16, June 2015.
- [3] T. Ohtsuki, T. Aiba y M. Matsuura, «Simultaneous Radio-Frequency and Baseband Signal Transmission Over a Multimode Fiber,» *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, n° 6, Art no. 7205512, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2957066, pp. 1-12, Dec. 2019.
- [4] G. R y B. E, «OptSim Application Notes and Examples OptSim,» *Optical Solutions Group 400 Executive Boulevard, Suite 100 Ossining, NY 10562*, vol. 2, n° 9149232169, pp. 561-572, 2013.
- [5] D. H. Sim, Y. Takushima y Y. C. Chung, «Transmission of 10-Gb/s and 40-Gb/s Signals over 3.7 km of Multimode Fiber using Mode-Field Matched Center Launching Technique,» *OFC/NFOEC 2007 - 2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference*, n° doi: 10.1109/OFC.2007.4348821., pp. 1-3, 2007.
- [6] M. Kagami, A. Kawasaki, M. Yonemura, M. Nakai, Selviah, P. V. Mena y D. R., «Encircled Angular Flux Representation of the Modal Power Distribution and Its Behavior in a Step Index Multimode Fiber,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, n° 3, doi: 10.1109/JLT.2016.2516644., pp. 943-951, 1 Feb.1, 2016.
- [7] I. G. Mestre, «Sistemas de banda ancha sobre fibras ópticas multimodo empleando fuentes estrechas y excitación modal central,» *Universiad Politécnica de Valencia*, vol. Primera edición 2011, n° n° Ref. editorial: 5500, pp. 24-26, Valencia, 2008.
- [8] D. H. Sim, Y. Takushima y Y. C. Chung, «High-speed multimode fiber transmission by using mode-field matched center-launching technique,» *JLT.2008 - 2008 Journal of lightwave technology*, vol. 27, n° no.8, doi: 10.1109/JLT.2008.2005040., pp. 1-3, April.15,2009.
- [9] S. Wang, Y. Qin, O. Xu, J. Li y S. Fu, «Polarization-Maintaining Multi-Core Few-Mode Fiber With a Cladding Diameter of 125 μm ,» *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, n° 7200210, doi: 10.1109/JPHOT.2021.3074404., pp. 1-10, June 2021.
- [10] B. L. Campos, «Investigación sobre spatial-division multiplexing (SDM) en comunicaciones por fibra óptica,» *Universidad Politécnica de Catalunya*, vol. 1, pp. 22-51, 2016.
- [11] I. Ashry, Y. Mao, A. Trichili, B. Wang, T. K. Ng, M.-S. Alouini y B. S. Ooi, «A Review of Using Few-Mode Fibers for Optical Sensing,» *IEEE Access*, vol. 8, n° doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027965, pp. 179592-179605, 2020.
- [12] C. M. O. Lima, «Transmisión vía fibra óptica de señales analógicas utilizando subportadora modulada en frecuencia de pulsos: aplicación potencial e instrumentación y control,» *INAOE*, vol. I, pp. 2-13, 2010.
- [13] D. C. A. Salamanca, «Diseño e Implementación de un Módulo para Simular Fibras de Pocos Modos,» *Universidad Politécnica de Catalunya*, vol. I, pp. 5-17, 2017.